第 37 卷第 21 期 生 态 学 报 Vol.37,No.21
2017 年 11 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Nov.,2017

DOI: 10.5846/stxb201608231719

孟现勇,王浩,雷晓辉,蔡思宇.基于 CMDAS 驱动 SWAT 模式的精博河流域水文相关分量模拟、验证及分析.生态学报,2017,37(21):7114-7127.
Meng X Y, Wang H, Lei X H, Cai S Y.Simulation, validation, and analysis of the Hydrological components of Jing and Bo River Basin based on the SWAT model driven by CMADS.Acta Ecologica Sinica,2017,37(21):7114-7127.

基于 CMDAS 驱动 SWAT 模式的精博河流域水文相关分量模拟、验证及分析

孟现勇,王 浩*,雷晓辉,蔡思宇
中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038

摘要:利用大气和水文模型定量描述陆表相关变量变化规律一直是大气科学和水文学界的研究热点。然而,由于我国西部地区站点匮乏,传统气象观测站点已不能满足大尺度地表分量高精度模拟分析的需求。建立 SWAT 模型中国大气同化驱动数据集(China Meteorological Assimilation Driving Datasets for the SWAT model, CMADS)驱动 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型(简称为 CMADS+SWAT 模式),选取传统气象站点稀缺的新疆精博河流域为靶区,完成流域各地表分量(如土壤湿度、雪深、融雪)校准、验证及其时空关系提取与分析。分析发现:CMADS 数据集可很好地驱动、率定 SWAT 模式完成本地化工作。其中,CMADS+SWAT 模式在月尺度上总体 NSE 效率系数均在 0.659—0.942,日尺度也均在 0.526—0.815。对流域内土壤湿度和融雪过程进行相关分析发现:精博河流域土壤湿度在年内 3—4 月份达到其第一次峰值,主要贡献来自于流域内高山融雪现象;融雪期结束后,流域降水量增加,伴随气温上升等现象导致土壤温度呈现波动态势,至 10 月中旬冷空气过境产生较大降水(雪),最终使土壤水转变为冻土,直至次年接近融雪期,土壤水再次增加直到融雪过程结束。一方面证明 CMADS+SWAT 模式可有效提高 SWAT 水文模型在我国西北干旱区(站点稀缺区域)的表现能力,另一方面理清了精博河流域相关地表分量(土壤湿度、蒸发等)时空演变规律。本研究对我国大气水文学科发展将起到一定的科学促进作用。

关键词:CMADS; SWAT; 精博河流域;地表分量

Simulation, validation, and analysis of the Hydrological components of Jing and Bo River Basin based on the SWAT model driven by CMADS

MENG Xianyong, WANG Hao*, LEI Xiaohui, CAI Siyu
State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, *China*

Abstract: Describing the changing rules of land surface variables by using meteorological and hydrological models has always been a research hotspot in the fields of atmospheric and hydrological science. However, due to the scarcity of weather stations in West China, traditional weather stations cannot satisfy the requirements of high precision simulation of large scale land surface components. Using the Jing and Bo River Basin in Xinjiang as a research area, the present study used the China Meteorological Assimilation Driving Datasets for the SWAT model (CMADS) to drive the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model, and then completed calibration, verification, and time-space relation analysis of each land surface component (such as soil moisture content, snow depth, and snow melt). Our analysis showed that the CMADS dataset can drive and calibrate the SWAT mode land complete localization work in Jin and Bo River Basin. The NSE efficiency

基金项目:"南水北调中线干线工程应急运行集散控制技术研究与示范"(2015BAB07B03);国家 973 计划课题(2013CB036406);北京市科技计划课题(Z141100006014049);2016 年度流域水循环模拟与调控国家重点实验室代表性成果培育课题(2016CG05)

收稿日期:2016-08-23; **网络出版日期**:2017-07-11

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wanghao@ iwhr.com

coefficients of the SWAT model driven by the CMADS dataset were generally controlled between 0.659 and 0.942 at the monthly scale, and were also controlled between 0.526 and 0.815 at the daily scale. Furthermore, our analysis indicated that the soil moisture content would reach a high level for the first time between March and April each year, which is mainly caused by snow melting in the high mountains. However, when snow melting finished, due to an increase in precipitation and temperature, soil temperature fluctuated until the middle of October, when cold air brought considerable precipitation and snow. Finally, soil water was transformed into frozen soil until the snow melting period in the following year. Thereafter, soil water would increase again until the end of the snow melting period. On one hand, this study verified that the CMADS+SWAT mode can enhance the performance ability of the SWAT model in the arid areas of northwestern China, which lacks weather stations. On the other hand, the study provided a scientific explanation for time-space changing rules of land surface components (such as soil moisture and evaporation) in the Jing and Bo River Basin. The findings of this research will play a certain role in promoting the development of China′s meteorological and hydrological sciences.

Key Words: CMADS; SWAT; Jing and Bo River Basin; surface component

近年来,全球范围内均面临严重的生态与水危机,干旱区陆面过程变化无论对整个内陆河流水循环亦或是对整个干旱区生态环境演变均具重要影响。其中,干旱内陆区水量、水质加速骤减与恶化也促使该地区突发性水事件频繁发生。干旱区绿洲构造独特,水与能量循环具备其自身的特殊规律,系统分析新疆干旱区地表水资源相关分量时空变化意义重大,这将为我国实现内陆干旱区流域生态水文可持续发展提供重要科学依据。精博河流域位于新疆地区西部,封闭流域总面积达 25 万 km^2。流域在西、北,南等 3 个方向均为高山,中间为谷地,东边为盆地。地貌及地形宏观上与准噶尔盆地连为一体,大体分为山、谷、盆三大地貌。流域交汇处正好位于阿拉山口大风下沉通道,故大风灾害是该流域最大的气象灾害。此外,由于该流域生态结构极其脆弱,导致研究区内风沙频繁、盐渍化及荒漠化现象严重。近年来,由于气候变暖加剧及人类垦荒活动不断,导致流域内艾比湖入湖水量不断减少,生态环境持续恶化。据不完全统计,自 20 世纪 50 年代至 70 年代以来,精博河流域内艾比湖面积萎缩了近 678km^2,艾比湖储水量共损耗近 23 亿 m^3。水资源的急剧下降导致艾比湖水体矿化度急剧攀升,湿地面积骤然减小,湖泊对气候的调控作用降低,对流域内生态系统及当地居民的生存环境造成了极大的破坏影响,并最终导致精博河生态环境迅速恶化,发生了生物链断层、多样性减少,荒漠化过程加剧等现象。由于精博河流域对新疆生态平衡及社会经济发展均具有重大贡献,利用高精度大气数据驱动成熟水文模型的输出结果可为流域提供一定的可持续发展决策,促进精博河流域地表过程分量(生态、水文等) 合理发展。

由于精博河流域传统气象站点稀缺,流域下垫面分异较大,加之气候变化及人为活动的影响,增强了该区域模式输出与评估的不确定性[1]。众多研究证明:融合更多观测数据的大气同化数据集可更大程度提高模式输出精度[2-5]。当前,国内外大气再分析种类繁多,如: NCEP 的 NCAR/DOE[6-7],欧洲预报中心 ERA—15、ERA—40、ERA—Interim 再分析资料[8]、日本 JRA—25 再分析资料[9]及陆面模式驱动场 Princeton 数据集。由于传统大气观测台站并未布满全球,以上再分析数据集对气象缺测区气候场景分析及应用提供了重要数据支撑[10]。然而,对于区域精细化模拟而言,以上再分析数据的准确性亟待提高。Pal 等[11]利用区域气候模式 RegCM3 对东亚季风区冬、夏两个季节内降水量的月变化规律在季节尺度上进行了模拟与评估后发现:区域模式 RegCM3 对降水量存在较大误差,这种现象在冬季显得尤为凸显。赵天保等利用 NCEP、ERA 及 JRA 等数据集的地面压强及温度要素在中国区域可用性进行评估后发现:3 种再分析数据集存在明显的季节性和区域性差异[12-14]。施晓晖等[15-16]利用各类技术手段将 NCAR 驱动数据(包括:空气温度、风速)在中国区域的适用性进行评估后发现:风场数据距平误差与海拔表现为负相关现象。以上研究均表明:各类再分析产品虽可较好地反映出大尺度气象要素空间模态,然而,由于大部分再分析数据集并未利用我国全部区域自动站进行订正,故不能较好地反映我国近地表真实气象状况。综上所述:利用更接近我国真实气象场的大气数据集驱

动成熟的水文模型,可更好的对我国大尺度地表分量时空演变规律进行细致化分析[10]。

本研究以站点稀缺、下垫面分异较大的新疆博精河流域作为典型验证及分析区,利用 SWAT 模型中国大气同化驱动数据集(CMADS)[10]驱动在我国应用普遍的 SWAT 水文模型,以期在为该流域提供有效生态水文系统恢复策略的同时,验证 CMADS 数据集在中国西部地区的适用性。

1 研究区介绍

精博河流域地处西天山北坡(图 1),介于 81°46′—83°51′E,44°02′—45°10′N 之间。总面积达 11275km^2,流域内降水多为来自北冰洋和大西洋的水汽,呈现总体山区较平原多,西部较东部多,阴坡较阳坡多的态势。精河和博尔塔拉地区的冰川面积均分别为 96.2km^{2}和 110.3km^2。其中,精河冰川补给量在年际上约为 0.96 亿 m^3,博尔塔拉河约为 1.05 亿 m^3,分别占据了其本身河川总径流的 20.6%和 21.4%。近年来,流域内艾比湖湖水矿化度在逐年升高,流域生态与生活用水矛盾也随之日益凸显。流域土地退化现象严重,其中,艾比湖流域湖底已有 1500km^{2}区域退化沦为盐漠,盐渍化面积达 71km^2。

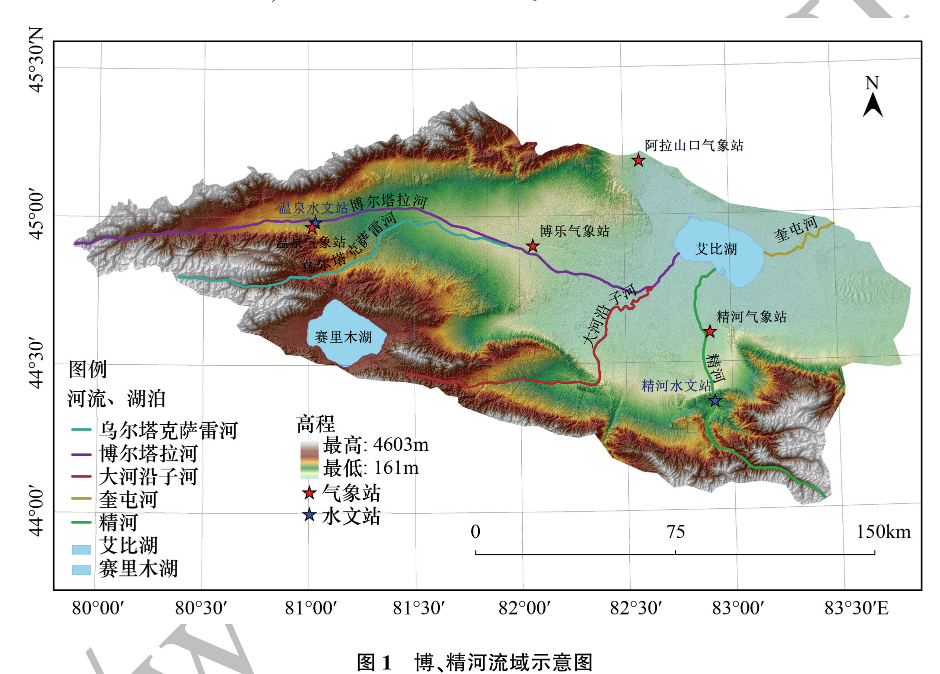


图 1 博、精河流域示意图

Fig.1 Schematic diagram of the Jing and Bo River Basin

近年来,学者们对于精博河流域乃至整个新疆区域的研究仅基于各类再分析数据(或区域气候模式)及传统气象观测数据。由于流域内仅有 4 个气象站,导致对该区域还未进行较为合理可信的水文过程模拟与分析工作。本研究将基于面向东亚的高分辨率大气驱动场 CMADS 数据集驱动 SWAT 模型,对精博河水文相关分量进行细致模拟,以期系统分析精博河流域各地表要素时空演变特征,同时为我国高分辨率气象数据驱动复杂水文模式研究打下坚实基础。

2 材料与方法

2.1 SWAT 模型地表输入数据

2.1.1 数字高程模型数据

SWAT 模型输入数据主要包括数字高程模型(DEM)、土壤数据、土地利用数据及气象驱动场。其中,数字高程模型选取自 SRTM —(90m) DEM(图 2), 该数据来源于 CGIAR—CSI SRTM 90m 高程数据库(http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp)。

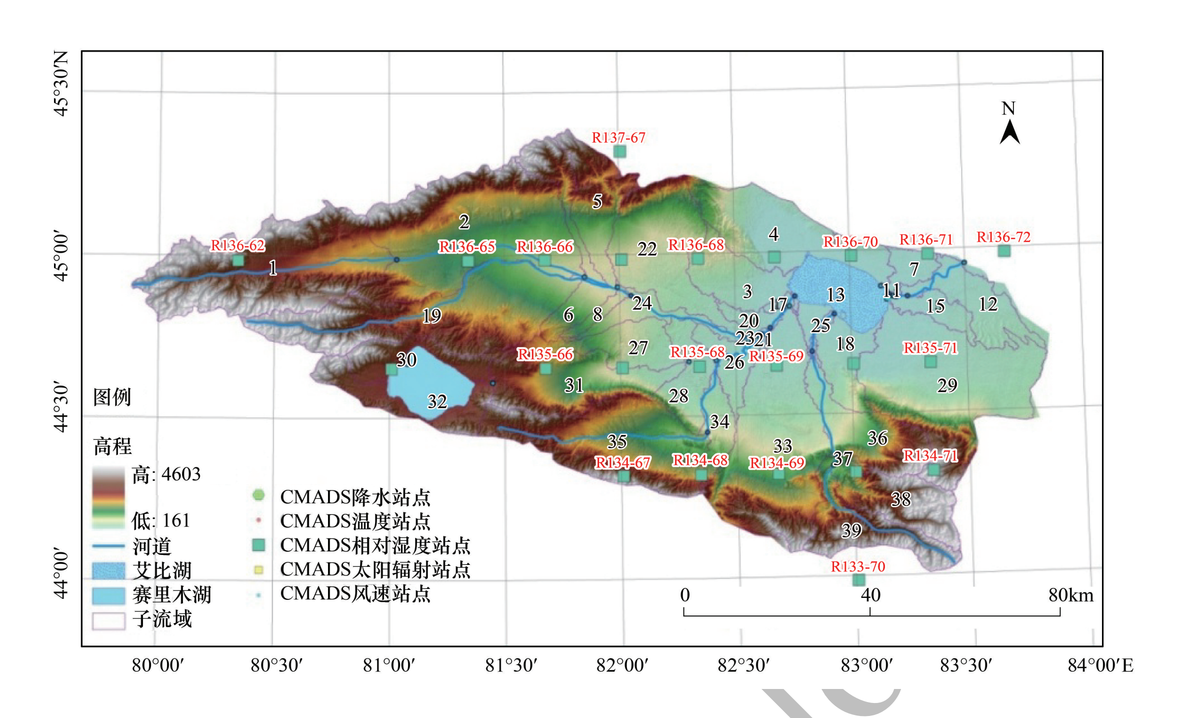


图 2　研究区高程及 SWAT 模型其他输入数据

Fig.2　The elevation of the study area and the input data for SWAT model

2.1.2　精博河流域土壤分布

土壤物理特性决定了 SWAT 模型不同水文响应单元的产、汇流特征,同时也是 SWAT 模型定义水文响应单元(HRU)的参考依据。本研究选用的土壤输入数据为基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集(V1.1)(图 3A)[16]。土地利用来源于精博河流域管理处,土地利用数据叠加了我国第二次冰川数据集[17],叠加后的土地利用分布情况可参见图 3B。为保证模式分辨率一致,本研究将 DEM、土壤与土地利用等数据空间分辨率均统一为 1km,平面投影坐标统一设置为 WGS_1984_UTM_Zone_44N。

2.1.3　大气驱动数据

本研究使用的大气输入数据为 SWAT 模型中国大气同化驱动数据集(China Meteorological Assimilation Driving Datasets for the SWAT model, CMADS),该数据集引入了中国陆面同化系统,保证了气象输入数据的可靠性[10]。CMADS 站点具体信息见表 1 及表 2。

表 1　CMADS 数据集信息

Table 1　The information of CMADS driving data

数据集 Datasets	CMADS (V1.0) China Meteorological Assimilation Diving Datasets for the SWAT model (Version 1.0)
提供要素 Provide elements	日最高/低气温、日平均相对湿度、日均风速、日累计降水量、日累计太阳辐射
原始空间范围 Original space range	0—65°0′N,60—160°0′E
本研究空间范围 Spatial scope	81°46′—83°51′E　44°02′—45°10′N
时间尺度 Time scale	2008.1.1—2014.12.31
原始分辨率 Original resolution	1/3°,1/4°,1/8°,1/16°
本研究使用空间分辨率 Spatial resolution in this study	1/3°
站点数 Station number	23 个

CMADS V1.0 版本空间分辨率为 1/3 度,时间分辨率为逐日,数据尺度为 2008—2014 年。SWAT 模型在精博河流域共读取了 CMADS 数据集近 23 个站点要素(温、湿、风、降水及辐射数据)。其中,CMADS 气象站点具体信息(站点名称及经纬度)如表 2 所示。

2.1.4　水文验证数据

本研究将精博河流域内水文站逐日流量资料作为模型率定及验证资料,台站信息如表 3 所示。

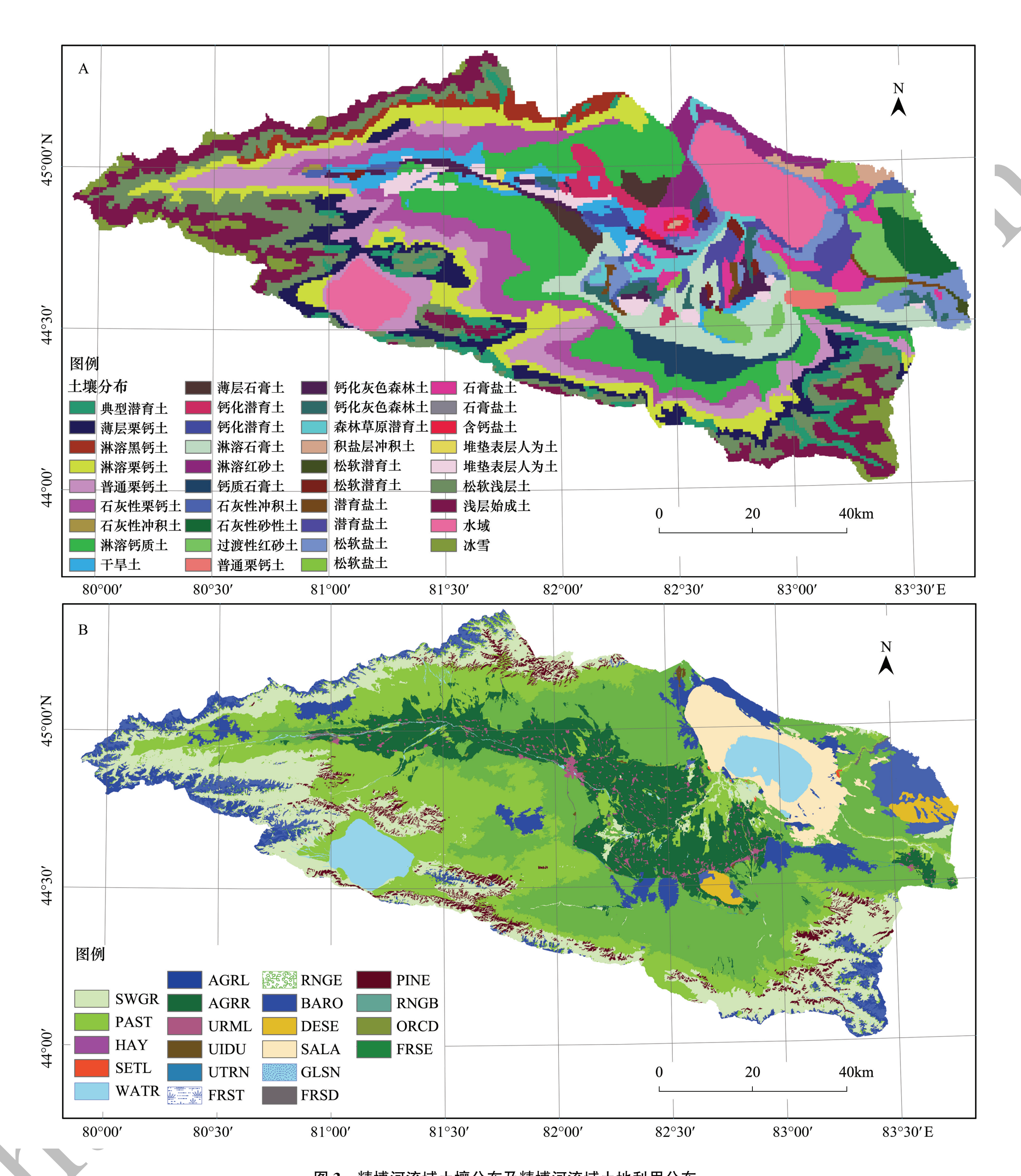


图 3 精博河流域土壤分布及精博河流域土地利用分布

Fig.3 Soil distribution in the Jing and Bo River Basin, and Land use distribution in the Jing and Bo River Basin

注:SWGR:细芽草,Slender Wheatgrass;PAST:牧场,Pasture;HAY:干草,Hay;WETL:混合湿地,Wetlands-Mixed;WATR:水域,Water;AGRL:其他作物,Agricultural Land-Generic;AGRR:中耕作物,Agricultural Land-Row Crops;URML:居民区,Residential-Med/Low Density;UIDU:工业用地,Industrial;UTRN:交通用地,Transportation;FRST:林地,Forest-Mixed;RNGE:草场,Range-Grasses;BARO:裸岩,Bare rock;DESE:荒漠,Desert;SALA:盐碱地,Saline land;GLSN:冰川/永久积雪,Glacier and snow;FRSD:落叶林,Forest-Deciduous;PINE:针叶林,Pine;RNGB:灌木林,Range-Brush;ORCD:果园,Orchard;FRSE:常绿林,Forest-Evergreen

表 2　精博河流域 CMADS 站点分布

Table 2　The station distribution of CMADS in Jing and Bo River Basin

CMADS 站点名 Stations name of CMADS	纬度 N/(°) Latitude	经度 E/(°) Longitude	高程/m Elevation	CMADS 站点名 Stations name of CMADS	纬度 N/(°) Latitude	经度 E/(°) Longitude	高程/m Elevation
136—62	44.99	80.34	2968.00	136—68	44.99	82.34	583.00
136—65	44.99	81.34	1074.00	135—67	44.65	82.01	504.00
136—69	44.99	82.68	184.00	135—68	44.65	82.34	296.00
137—67	45.32	82.01	1863.00	135—64	44.65	81.01	2072.00
136—66	44.99	81.68	735.00	135—66	44.65	81.68	1432.00
136—71	44.99	83.34	232.00	134—69	44.32	82.68	936.00
136—67	44.99	82.01	649.00	134—68	44.32	82.34	1652.00
136—70	44.99	83.01	206.00	134—67	44.32	82.01	2981.00
136—72	44.99	83.67	249.00	134—70	44.32	83.01	1898.00
135—71	44.65	83.34	236.00	134—71	44.32	83.34	3057.00
135—70	44.65	83.01	206.00	133—70	43.99	83.01	2338.00
135—69	44.65	82.68	263.00				

CMADS 站点名为 CMADSV1.0 数据集在其空间范围(东亚区域)内唯一标识符

表 3　精博河流域水文站相关信息

Table 3　Hydrological stations data statistics in Jing and Bo River Basin

水文站 Hydrological station	纬度 Latitude	经度 Longitude	台站海拔/m Station elevation	数据时段/a Data interval
温泉 Wenquan	44°59′N	81°02′E	1310	2009—2013
精河 Jinghe	44°22′N	82°55′E	620	2009—2013

2.2　SWAT 水文模式介绍

SWAT 模型概化的将相同土地覆被/利用、土壤分布及管理方式的均一性单元视为同一类水文响应单元(HRU),模型认为每一种 HRU 内所有水量平衡过程具一致性特征[18]。SWAT 模型提供了 3 种潜在蒸发计算方法,主要包括 Penman-Monteith 法[18-20],Priestley-Taylor 法[21]及 Hargreaves 法[22-25]。在本研究中,由于 CMADS 数据集可提供全部输入要素(而传统气象站由于无法提供太阳辐射数据仅能利用天气发生器模拟),本研究选取 Penman-Monteith 法作为蒸发模拟的方法,以最大可能提高模式模拟精度[20]。

3　SWAT 模型方案设置

本研究区流域面积经过 ArcGIS 提取后为 2482366.4052hm^2,共划分 39 个子流域及 1648 个水文响应单元。由于降水输入数据为逐日数据,地表径流模拟方法选取径流曲线数模型计算,地表径流将被分别在不同水文响应单元中进行模拟,最终汇流到主河道。最后,选取基于连续方程的河槽蓄量法计算主河道水量演进。SWAT 模型通过 Centriod 法将流域内单点气象数据空间离散插值到整个流域,为减少空间离散插值带来的误差(尤其是高海拔区),本研究针对精博河流域划分出多个高程带以期精确识别不同高程带降水量分布状态。

综合 CMADS 驱动场时间尺度(2008—2014 年)及径流观测数据的重合区间,同时为使模拟初期所有水文过程从初始状态进入平衡状态,本研究将预热期设定为 1 年(即 2008 年),校准期设为 2009—2010 年,验证期设定为 2011—2013 年。

3.1　敏感性分析

本研究利用 SWAT-CUP 对 SWAT 模式进行模式率定工作。SWAT-CUP 是 EWAGE 研究所针对 SWAT 模型研发的一款自动校准与不确定性分析的程序[26]。在本研究中,重点对 12 个与径流相关的参数进行参数率定,并得到模式参数最终取值(表 4)。

3.2 模型校准

在模型率定期(2009—2010 年)对模型参数进行校准工作。笔者先利用 SWAT-CUP 率定软件对精博河流域两个测站同时进行参数校准,校准过程中兼顾参考流域年均蒸发量及降水量情况下进行宏观调整,首先考虑年蒸发量和径流量的关系比,保证模拟结果符合精博河流域年总蒸发量、降水量及径流量接近实际真实情况。分然后延展至月,在月数据校准准确后进行日参数率定及微调。分析发现:SWAT 模型降水递减率(PLAPS)参数最优取值为 44.5mm/km。温度梯度(TLAPS)最优值为-4.3039℃/km(表 4),与流域内多年实际均值吻合。

表 4 SWAT 模型参数最终取值结果

Table 4 The final results of the model parameters within SWAT model

变量名 Variable	参数定义 Parameter definition	最终优选值 Final optimal value
CN2.mgt	SCS 径流曲线值	34
ALPHA_BF.gw	基流 α 因子(days)	0.453
GW_DELAY.gw	地下水补给延迟时间(days)	42
GWQMN.gw	地下水汇入主河道时浅层含水层的水位阈值(mm)	8.5
GW_REVAP.gw	地下水再蒸发系数	0.03
ESCO.hru	土壤蒸发补偿系数	1.008
ALPHA_BNK.rte	基流退水常数(days)	0.45
SFTMP	降雪日的平均空气温度(℃)	4.8
PLAPS	降水直减率(mm/km)	44.5
SMFMN	12 月 21 日的融雪因子(mm/d-℃)	9.407
SMFMX	6 月 21 日的融雪因子(mm/d-℃)	0.1302
TLAPS	温度直减率(℃/km)	-4.3039

CN2:SCS 径流曲线值,Initial SCS runoff curve number for moisture condition II;ALPHA_BF:基流 α 因子,Baseflow alpha factor;GW_DELAY:地下水补给延迟时间,Groundwater delay time;GWQMN:地下水汇入主河道时浅层含水层的水位阈值,Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur;GW_REVAP:地下水再蒸发系数,Groundwater "revap" coefficient;ESCO:土壤蒸发补偿系数,Soil evaporation compensation factor;ALPHA_BNK:基流退水常数,Baseflow alpha factor for bank storage;SFTMP:降雪日的平均空气温度,Snowfall temperature;PLAPS:降水直减率,Precipitation lapse rate;SMFMN:12 月 21 日的融雪因子,Melt factor for snow on December 21;SMFMX:6 月 21 日的融雪因子,Melt factor for snow on June 21;TLAPS:温度直减率,Temperature lapse rate

3.3 模型评估

本研究选取(NSE,Nash-Sutcliffe Efficiency)效率系数及 R^2 决定性系数作为模型评估指标,以上指标被广泛的应用于评估模型的性能[27-28]。其中,Nash-Sutcliffe 效率系数是一个正态统计方程,它反映了观测值与对应模拟值的拟合程度。NSE 可利用方程(1)计算[27-28]:

$$\mathrm{NSE} = 1 - \frac{\sum_i (Q_m - Q_s)_i^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \overline{Q_m})^2} \tag{1}$$

式中,Q 为径流值变量,Q_m 和 Q_s 分别代表观测值及模式值。$\overline{Q_m}$ 表示径流平均观测值。NSE 变化范围为-∞ 至 1,当 NSE 计算结果为 1 时,认为观测值与模拟值完全吻合;当其值为 0.5—1 之间时,模式结果可接受,当 NSE 小于 0 时,认为模式结果较差。

决定性系数 R^2 表示变量之间相关程度(见式 2):

$$R^2 = \frac{\left[\sum_i (Q_{m,i} - \overline{Q_m})(Q_{s,i} - \overline{Q_s})\right]^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \overline{Q_m})^2 \sum_i (Q_{s,i} - \overline{Q_s})^2} \tag{2}$$

式中, Q_m , Q_s 和式(6)中的含义相同,i 变量表示第 i 次的模拟或实测值。

众多研究将 R^2>0.5 且 NSE>0.5 作为 SWAT 模型模拟满意的准则[29],亦有研究认为 NSE>0.4 也可作为模型指标满意的标准,本研究采用 Moriasi 等评价标准[30]。即模型在率定期的月尺度模拟结果 NSE≥0.65 或日尺度模拟结果 NSE ≥0.5,说明模型模拟结果可接受[31]。

4　结果分析

4.1　基于 CMADS+SWAT 模式的径流量模拟验证及分析

本研究利用 CMADS+SWAT 模式分别输出流域两内两个水文控制站(精河山口控制站及温泉站)逐月径流量,利用观测结果进行参数率定与校准工作(图 4—图 7)。

分析发现:在月尺度上,由 CMADS 驱动下的 SWAT 模型模拟结果在精博河流域两个控制站均到达了满意的效果(见表 5)。由 CMADS 驱动下的模拟结果在精河山口站的 NSE 和 R^2 均取得了令人满意的表现(NSE = 0.939, R^2 = 0.942)。

在模型验证期,虽然 NSE 效率系数与确定性系数 R^2 较率定期略微偏低,也得到了可接受的效果(NSE = 0.904, R^2 = 0.934)。相对精河山口控制站来说,温泉站在率定期和验证期的模拟精度均较前者略低。笔者认为,温泉上游高寒山区冰川对温泉站模拟结果影响巨大,由于 SWAT 模型度日因子仅对融雪进行了细致化考虑,导致流域在温泉站的模拟精度要低于精河控制站(冰川补给率较温泉控制站小)所在子流域。

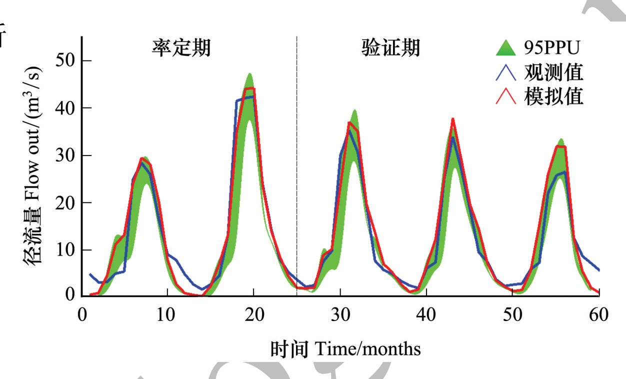


图 4　CMADS 数据集驱动 SWAT 模型的精河山口控制站逐月模拟结果(2009—2013),其中,95PPU 代表预测不确定性内监测数据占据的百分比

Fig.4　The monthly simulation results (2009—2013) simulated by SWAT model driving by CMADS in Jinghe control station, where the percentage of measured data bracketed by the 95% prediction uncertainty (95PPU)

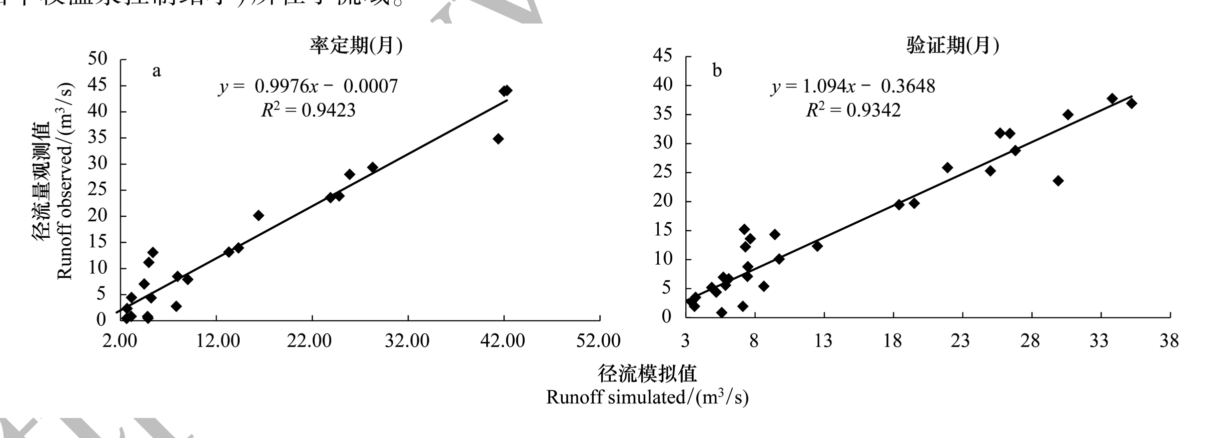


图 5　精河山口控制站月观测与模式模拟结果确定性系数

Fig.5　The certainty factor of the relationship between monthly observation and model simulation data in Jinghe control staion

当完成月尺度率定和验证后,本研究将月尺度最佳参数值带入 SWAT 模型进行日微调校准后发现:CMADS+SWAT 模式径流模拟结果在两个水文控制子流域与日观测结果呈现很好的一致性。(见图 8—图 11、表 5)。

在模型率定期,由 CMADS 驱动 SWAT 模式在精河站的日拟合结果(NSE = 0.801, R^2 = 0.815)与温泉站拟合结果(NSE = 0.796, R^2 = 0.791)也均较好。在验证期,虽然 SWAT 模式在两个站点模拟结果均可接受,而模式在精河山口站模拟效果(NSE = 0.851, R^2 = 0.796)较温泉控制站(NSE = 0.526, R^2 = 0.592)表现更佳。

4.2　基于 CMADS+SWAT 模式的土壤湿度及相关变量分析

将 SWAT 模型进行精博河流域本地化后，为从时空角度分析 CMADS+SWAT 模式在土壤湿度及融雪变量时空演变模拟能力，同时定量分析各分量之间响应关系，本研究还以精河子流域为主要分析对象，对多个要素响应关系进行了提取。

4.2.1　精博河流域融雪过程与土壤湿度响应分析

为研究精博河流域融雪过程对土壤湿度的影响，本部分提取精博河整个流域在 2012 年 4 月 8 日的土壤湿度及其对应融雪量空间变化图（图 12）。

图 12A 为当日土壤湿度分布情况，图 12B 为对应时期融雪空间分布情况。为定量研究流域内各地表分量间关系，研究提取了精河控制站子流域内各地表分量（包括土壤湿度、潜在蒸散发、降水量和融雪量）在 2012 年 4 月 8 日的时间序列分布（图 13）。

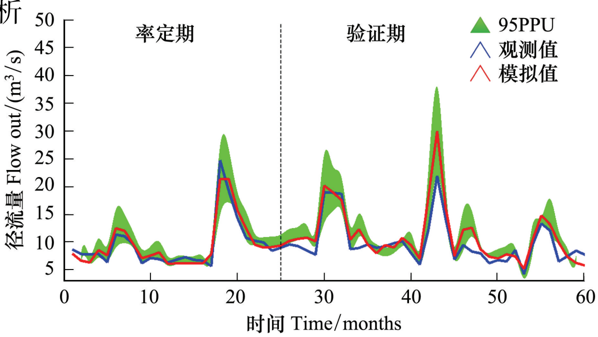


图 6　CMADS 数据集驱动 SWAT 模型的温泉控制站逐月模拟结果（2009—2013），其中，95PPU 代表预测不确定性内监测数据占据的百分比

Fig.6　The monthly simulation results simulated by SWAT model driving by CMADS in Wenquan control station, where the percentage of measured data bracketed by the 95% prediction uncertainty（95PPU）

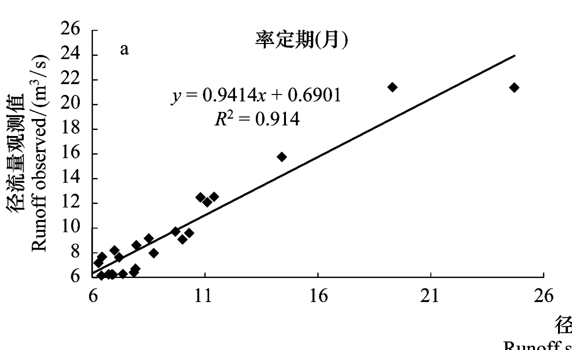


图 7　温泉控制站月站点观测与模式模拟结果确定性系数

Fig.7　The certainty factor of the relationship between monthly observation and model simulation data in Wenquan control station

通过对 2012 年 4 月 8 日精博河流域内土壤湿度分布分析发现：流域整体土壤湿度在该日处于偏湿状态（图 14）。其中，温泉站控制子流域土壤湿度为 18mm 至 20mm 左右，而精河控制站及其附近子流域土壤湿度达近 57mm。通过分析流域内对应融雪空间分布情况（图 14）后发现，2012 年 4 月 8 日，精博河流域内出现整体较大融雪现象，而发生融雪的区域恰好为西天山北坡地区，该区域年内 3—4 月雪盖覆盖丰厚。为定量分析精博河流域内融雪及土壤湿度量级及其直接响应关系，本研究对精河水文站控制子流域中土壤湿度与融雪量等分量进行了（以精河山口控制站为例）时序量级分析研究。

图 13 给出了精河控制子流域内各地表或近地表分量（潜在蒸散发，土壤湿度，降水量及融雪量等）在精河山口控制子流域时序分布状态。分析发现：精博河流域

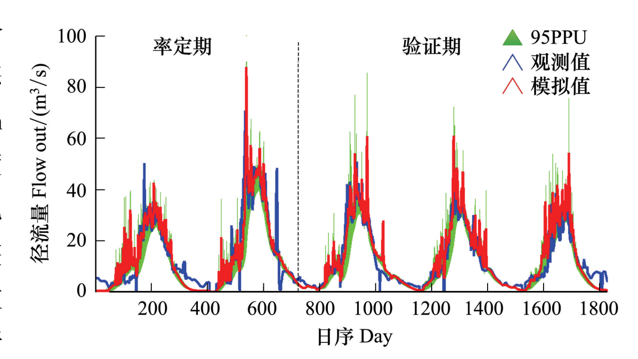


图 8　CMADS 数据集驱动 SWAT 模型的精河山口控制站逐日模拟结果（2009—2013），其中，95PPU 代表预测不确定性内监测数据占据的百分比

Fig.8　The daily simulation results（2009—2013）**simulated by SWAT model driving by CMADS in Jinghe control station, where the percentage of measured data bracketed by the 95% prediction uncertainty**（95PPU）

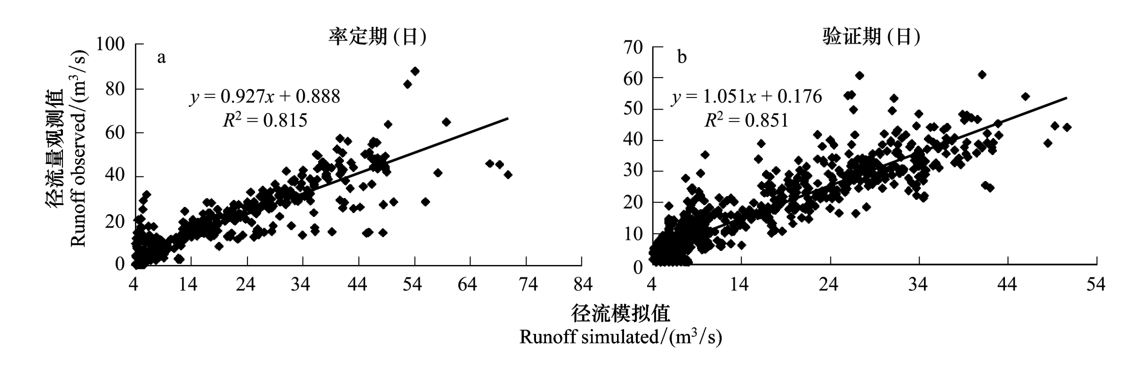


图 9　精河山口控制站日观测与模式模拟结果确定性系数

Fig.9　The certainty factor of the relationship between daily observation and model simulation data in Jinghe control staion

自 2012 年 3 月中旬开始出现融雪现象,并于 2012 年 4 月 8 日出现较大融雪现象。其中,精河站控制子流域融雪量达 18mm/d。当日精河控制站子流域土壤湿度也达到其年内较高水平(约 56mm)。分析表明:融雪期内,精博河流域土壤湿度增加的最主要贡献来自于融雪,仅极少量来自降水。此外,土壤湿度与潜在蒸发数值上呈反比关系。

4.2.2　精博河流域降水与土壤湿度响应分析

前文提到精河站控制子流域融雪过程对流域内土壤湿度具有较大影响。笔者认为降水量对土壤湿度贡献亦不容忽视。笔者在此重点分析了夏季与秋末降水对土壤湿度的影响。由于精博河流域土壤湿度在融雪后期至年内 9 月会出现较长时期波动,同时 10 月中后期将发生陡然上升现象并保持恒定等现象,笔者针对以上两阶段降水量与土壤湿度响应关系进行时空提取分

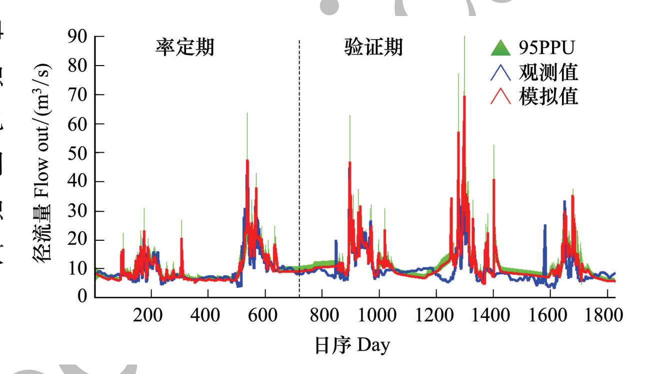


图 10　CMADS 数据集驱动 SWAT 模型的温泉控制站逐日模拟结果(2009—2013),其中,95PPU 代表预测不确定性内监测数据占据的百分比

Fig.10　The daily simulation results (2009—2013) simulated by SWAT model driving by CMADS in Wenquan control station, Where the percentage of measured data bracketed by the 95% prediction uncertainty (95PPU)

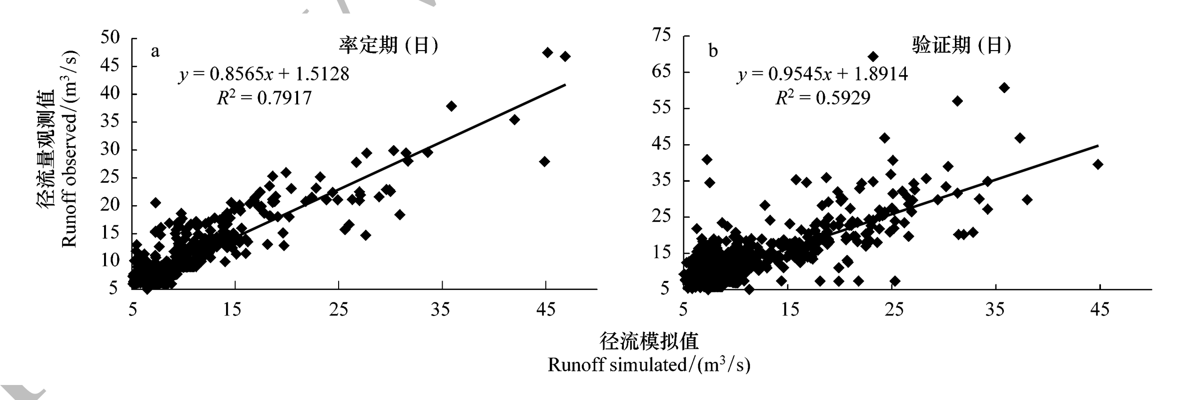


图 11　温泉控制站日观测模拟结果确定性系数

Fig.11　The certainty factor of the relationship between daily observation and model simulation data in Wenquan control station

析(图 14)。为验证精河山口控制站土壤湿度变化过程中其他相关变量(如:冻土及雪深)演变情况,研究还提取了精河山口控制站冻土和雪深逐日台站观测资料(2010 至 2011 年)(图 16)作为验证分析。

图 14 给出了精博河流域土壤湿度与降水量在日内(2010 年 6 月 22 日和 2011 年 10 月 21 日)空间分布情况。其中,图 14 为 2010 年 6 月 22 日精博河流域土壤湿度分布情况,图 14 为对应流域内降水量分布情况。分析发现:当日精河山口控制站子流域土壤湿度达 24.8mm,精河山口控制站子流域的降水量达 30.1mm。分

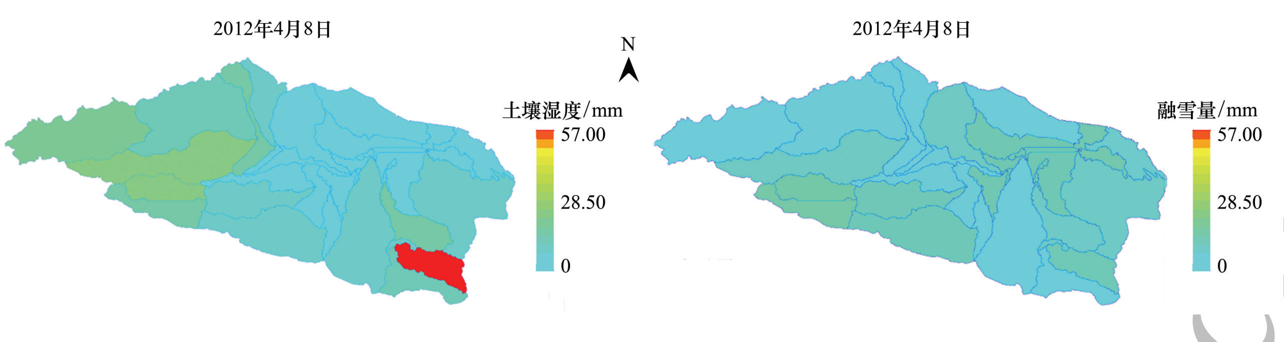


图 12 精博河流域土壤湿度与融雪量空间相关分析

Fig.12 The correlation analysis of soil moisture and snow melting in Jinghe River Basin

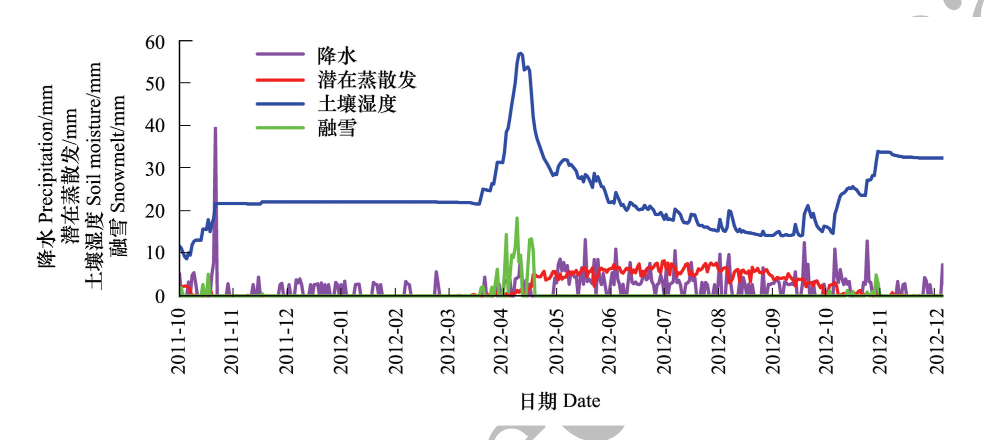


图 13 精博河流域各类分量时间序列分析(以精河山口控制站为例)

Fig.13 The correlation analysis in Jinghe River Basin (taking the control station of Jinghe as an example)

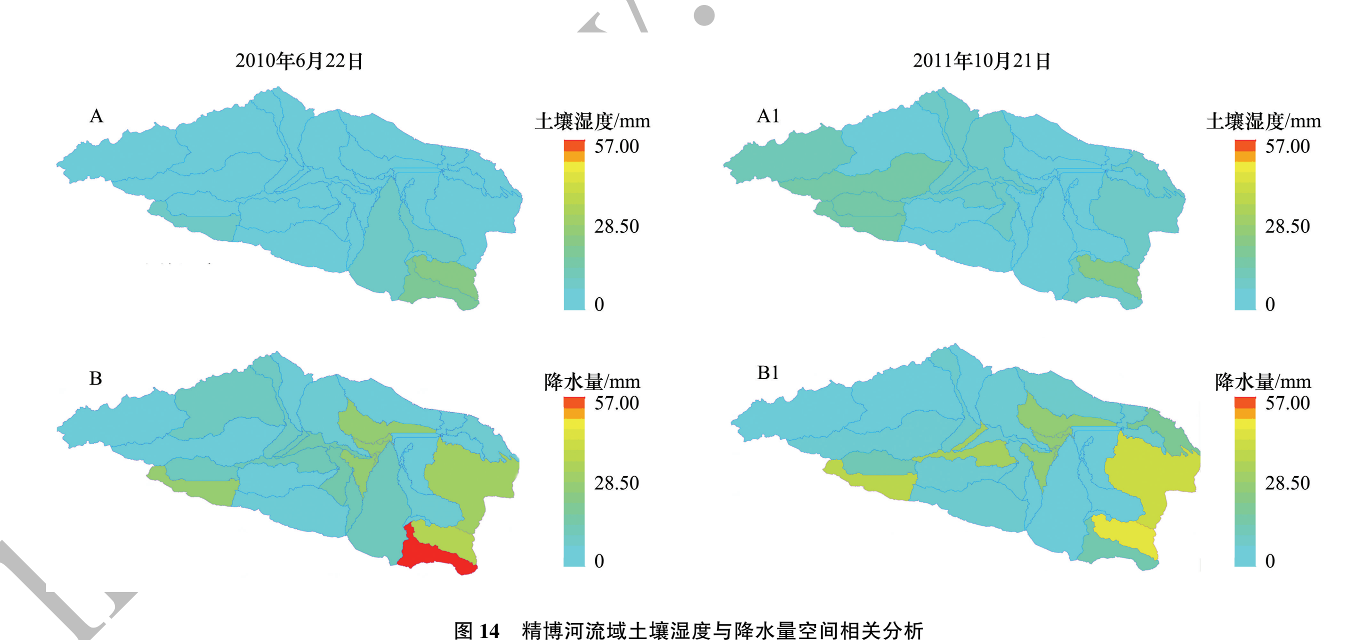


图 14 精博河流域土壤湿度与降水量空间相关分析

Fig.14 The correlation analysis of soil moisture and precipitation in Jinghe River Basin

析表明:降水量在日内大幅度增加导致该子流域土壤湿度在短时期快速攀升。类似情况同时出现于 2011 年,图 14 给出了精博河流域 2011 年 10 月 21 日土壤湿度的空间分布状态,图 14 为对应时期降水量在整个流域的分布状态。该时段精河控制站及温泉控制站所在的子流域土壤湿度较大,其中温泉站控制站所在子流域土壤湿度达 18mm 左右,精河山口控制站所在子流域土壤湿度达到近 22mm。分析还发现,在流域内土壤湿度达

到该时期较高水平的同时,降水过程在精博河整个子流域均有发生。为准确的验证土壤湿度与降水量在量级上的响应关系,本研究提取了精河山口控制站(2010 年至 2012 年)其他地表分量(潜在蒸散发、土壤湿度、降水量及融雪量)对应时序关系曲线(图 15)。

表 5　CMDAS+SWAT 模式径流输出的月、日拟合结果评估

Table 5　The assessment under monthly and daily scale simulated by CMADS+SWAT mode

时间尺度 Time scale	精河山口控制站 Jinghe control station				温泉控制站 Wenquan control station			
	率定期 NS Calibration NSE	率定期 Calibration R^2	验证期 NS Validation NSE	验证期 Validation R^2	率定期 NS Calibration NSE	率定期 Calibration R^2	验证期 NS Validation NSE	验证期 Validation R^2
月 Month	0.939	0.942	0.904	0.934	0.917	0.914	0.659	0.844
日 Day	0.801	0.815	0.802	0.851	0.796	0.791	0.526	0.592

NSE :纳什效率系数, Nash-Sutcliffe Efficiency

分析发现,在 2010 年 6 月 22 日,流域内精河山口控制站子流域降水量接近 30mm,流域内土壤湿度亦攀升至 24.8mm(图 15)。2011 年 10 月 21 日,精河山口控制站所在子流域内降水量达近 40mm,于此同时,子流域内土壤湿度值也快速攀升至 22mm 左右,土壤湿度在此后保持恒定状态(图 15)。秋末时期,精河山口控制子流域土壤湿度快速上升现象充分说明,年末降水对土壤湿度变化贡献较大。

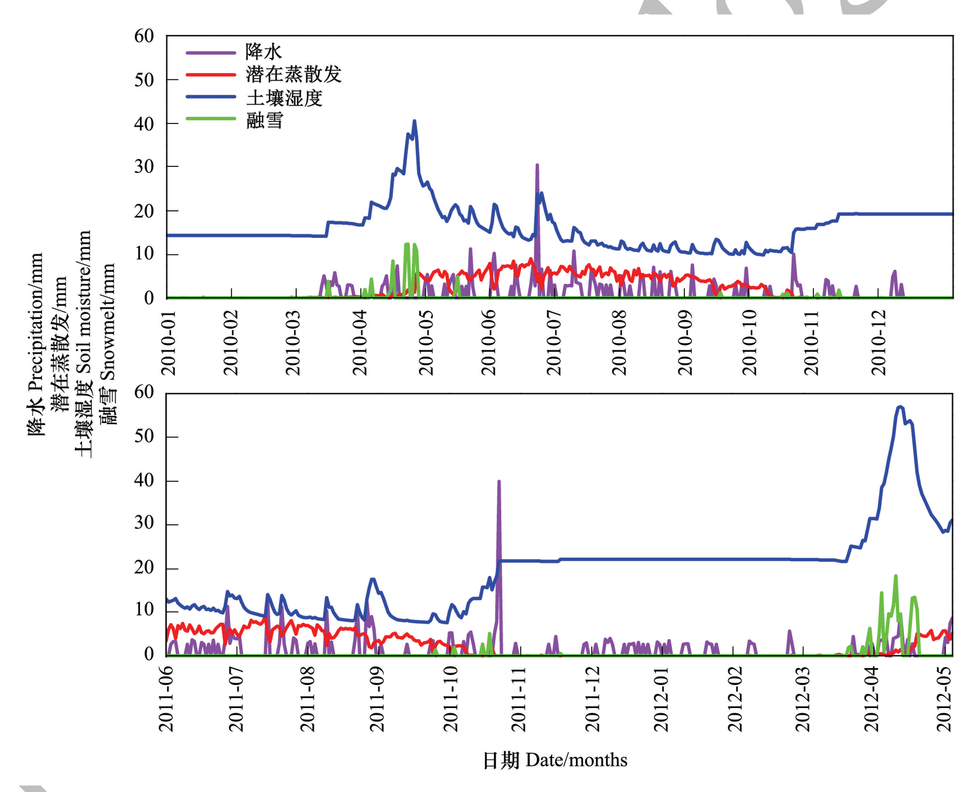


图 15　精博河流域土壤湿度与降水量时间序列分析(以精河山口控制站为例)

Fig.15　The correlation analysis of Soil moisture and precipitation in Jinghe River Basin (taking the control station of Jinghe as an example)

以年内循环角度对土壤湿度变化进行分析后发现:研究区内每年 3 至 4 月为融雪期,流域内雪深经历了先上升后下降的过程,并在融雪期结束时雪深接近 0m,这与本研究在精河站提取的雪深观测数据一致(图 16)。融雪期后期气候转暖,此时多雨期来临,造成研究区内土壤湿度快速攀升,由于空气温度在该时段较高,冻土发生融化现象(图 16)。蒸发同时增加并加速土壤水减少,导致该时期土壤湿度呈现波动变化趋势。10 月后期,流域由于冷湿气流过境出现大范围降水(降雪),此时土壤含水量将大幅增加,伴随冷空气来临而促使蒸发量大幅度下降。此时,土壤液态含水量冻结(每年 11 月至 12 月)并产生冻土。季节性冻土将在来

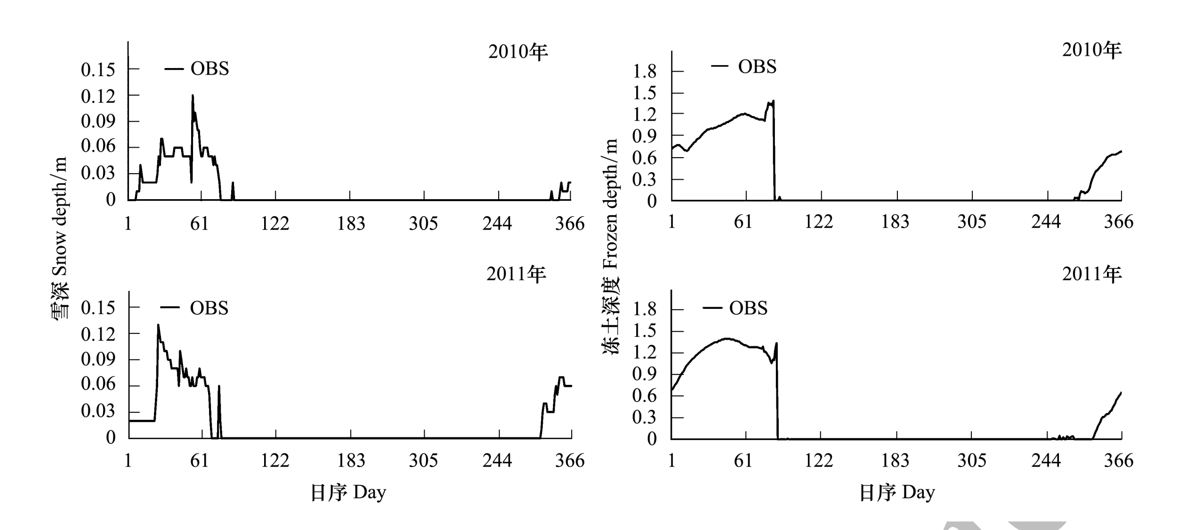


图 16 2010 年、2011 年精河控制站雪深、冻土观测值

Fig.16 The snow depth and frozen soil depth observation in Jinghe control station (Year 2010 and 2011)

年 1—2 月到达峰值直至次年融雪期再次陡然下降,冻土再次融化。此时,一部份冻土将转换变成土壤液态含水量。

综上所述,流域内土壤湿度在每年 3—4 月份到达其第一次较高水平,这主要是由于流域内积雪、冻土融化而造成的。融雪期结束后,由于降水量增多,空气温度上升导致土壤湿度呈现上下波动态势,直至 10 月中旬冷空气过境产生较大降水(雪)并最终使土壤水转换为冻土,至次年融雪期,土壤液态水再次增加直至融雪期结束。

5 讨论与结论

本文利用 CMADS 驱动 SWAT 模型对精博河流域内两个水文控制站进行了径流精度模拟验证工作,利用本地化的 SWAT 模型分析了精河控制站所在子流域各类地表分量(包括土壤湿度、潜在蒸散发、降水量和融雪量)时空变化规律,加深了对该子流域内各分量要素的空间演变规律,解释了研究区内土壤湿度在不同季节的变化机制。本研究后期将继续考虑将更多观测数据(如卫星遥感数据)同化到 SWAT 模型输出数据中,以提高 SWAT 模式的结果可靠性。在现有阶段,利用 CMADS 数据集驱动 SWAT 模型对研究高分辨率气象数据驱动复杂水文模型的研究意义较大,预计该数据集将为我国的水文生态细致化模拟研究提供数据支撑。

参考文献(References):

[1] 孟现勇, 孟宝臣, 王月健, 刘志辉, 吉晓楠,余丹林. 近 60 年气候变化及人类活动对艾比湖流域水资源的影响. 水文, 2015, 35(2): 90-96.

[2] Berg A A, Famiglietti J S, Walker J P, Houser P R. Impact of bias correction to reanalysis products on simulations of North American soil moisture and hydrological fluxes. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(D16): 4490.

[3] Maurer E P, Wood A W, Adam J C, Lettenmaier D P, Nijssen B. A long-term hydrologically based dataset of land Surface fluxes and states for the conterminous United States. Journal of Climate, 2002, 15(22): 3237-3251.

[4] Fekete B M, Vörösmaety C J, Roads J O, Willmott CJ. Uncertainties in precipitation and their impacts on runoff estimates. Journal of Climate, 2004, 17(2): 294-304.

[5] Sheffield J, Ziegler A D, Wood E F, Chen Y B. Correction of the high-latitude rain day anomaly in the NCEP-NCAR reanalysis for land surface hydrological modeling. Journal of Climate, 2004, 17(19): 3814-3828.

[6] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, Collins W, Deaven D, Gandin L, Iredell M,Saha S, White G,Woollen J, Zhu Y, Leetmaa A, Reynolds B, Chelliah M, Ebisuzaki W, Higgins W, Janowiak J, Mo K C, Ropelewski C, Wang J, Jenne R, Joseph D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bulletin of the American Meteorological Society, 1996, 77(3): 437-472.

[7] Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, Yang S K, Hnilo J J, Fiorino M, Potter G L. NCEP-DEO AMIP-II reanalysis (R-2).Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(11): 1631-1643.

[8] Uppala S M, KÅllberg P W, Simmons A J, Andrae U, Da Costa Bechtold V, Fiorino M, Gibson J K, Haseler J, Hernandez A, Kelly G A, Li X, Onogi K, Saarinen S, Sokka N, Allan R P, Andersson E, Arpe K, Balmaseda M A, BeljaarsA C M, Van De Berg L, Bidlot J, Bormann N, Caires S, Chevallier F, Dethof A, Dragosavac M, Fisher M, Fuentes M, Hagemann S, Hólm E, Hoskins B J, Isaksen L, Janssen P A E M, Jenne R, Mcnally A P, Mahfouf J F, Morcrette J J, Rayner N A, Saunders R W, Simon P, Sterl A, Trenberth K E, Untch A, Vasiljevic D, Viterbo P, Woollen J. The ERA-40 re-analysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2005, 131(612): 2961-3012.

[9] Onogi K, Tsutsui J, Koide H, Sakamoto M, Kobayashi S, Hatsushika H, Matsumoto T, Yamazaki N, Kamahori H, Takahashi K, Kadokura S, Wada K, Kato K, Oyama R, Ose T, Mannoji N, Taira R. The JRA-25 reanalysis. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2007, 85(3): 369-432.

[10] 孟现勇, 师春香,刘时银,王浩,雷晓辉,刘志辉,吉晓楠,蔡思宇,赵求东. CMADS 数据集及其在流域水文模型中的驱动作用——以黑河流域为例. 人民珠江, 2016, 37(7): 1-19.

[11] Pal J S, Eltahir E A. Pathways relating soil moisture conditions to future summer rainfall within a model of the land-atmosphere system. Journal of Climate, 2001,14(6): 1227-1242.

[12] 赵天保, 艾丽坤, 冯锦明. NCEP 再分析资料和中国站点观测资料的分析与比较. 气候与环境研究, 2004, 9(2): 278-294.

[13] 赵天保, 符淙斌. 几种再分析地表气温资料在中国区域的适用性评估. 高原气象, 2009, 28(3): 595-607.

[14] 赵天保, 符淙斌. 中国区域 ERA-40、NCEP-2 再分析资料与观测资料的初步比较与分析. 气候与环境研究, 2006, 11(1): 14-32.

[15] 施晓晖, 徐祥德, 谢立安. NCEP/NCAR 再分析风速、表面气温距平在中国区域气候变化研究中的可信度分析. 气象学报, 2006, 64(6): 709-722.

[16] Fischer G, Nachtergaele F, Prieler S, van Velthuizen H T, Verelst L, WibergD.2008. Global agro-ecological zones assessment for agriculture (GAEZ 2008). Laxenburg, Austria, Rome, Italy: IIASA, FAO.

[17] 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 许君利, 上官冬辉, 魏俊锋, 鲍伟佳, 吴立宗. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状. 地理学报, 2015, 70(1): 3-16.

[18] Monteith J L. 1965. Evaporation and environment. The state and movement of water in living organisms//The 19th Symposium of the Society on Experimental Biology. Swansea: Cambridge University Press.

[19] Allen R G. A Penman for all seasons. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1986, 112(4): 348-368.

[20] Allen R G, Jensen ME, Wright JL, Burman R D. Operational estimates of reference evapotranspiration. Agronomy Journal, 1989, 81(5): 650-662.

[21] Priestley C H B, Taylor R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. Monthly Weather Review, 1972, 100(2): 81-92.

[22] Hargreaves G H. Moisture availability and crop production. Transactions of the ASAE, 1975, 18(5): 980-984.

[23] Hargreaves G H, Samani Z A. Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering in Agriculture, 1985, 1(2): 96-99.

[24] Hargreaves G H, Samani Z A. Estimating potential evapotranspiration. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1982, 108(3): 225-230.

[25] Hargreaves G L, Hargreaves GH, Riley J P. Agricultural benefits for Senegal River Basin. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1985, 111(2): 113-124.

[26] Abbaspour K, Yang J, Reichert P, Vejdani M, Haghighat S, Srinivasan R. SWAT-CUP. SWAT calibration and uncertainty programs, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (EAWAG), 2008, Zurich, Switzerland.

[27] Nash J E, Sutcliffe R M. River flow forecasting through conceptual models part 1-a discussion of principles. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290.

[28] Schaefli B, Gupta H V. Do Nash values have value? Hydrological Processes, 2007, 21(15): 2075-2080.

[29] Santhi C, Arnold J G, Williams J R, Hauck L M, Dugas W A. Application of a watershed model to evaluate management effects on point and nonpoint source pollution. Transactions of the ASAE, 2011, 44(6): 1559-1570.

[30] Ahmad H M N, Sinclair A, Jamieson R, Madani A, Hebb D, Havard P, Yiridoe E K. Modeling sediment and nitrogen export from a rural watershed in Eastern Canada using the soil and water assessment tool. Journal of Environmental Quality, 2011, 40(4): 1182-1194.

[31] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, Bingner R L, Harmel R D, Veith T L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900.